

BAB II

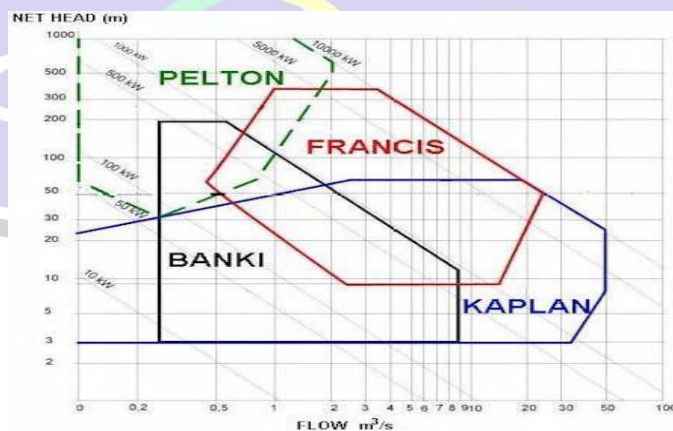
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Dasar Turbin Air

Sistem mikrohidro telah dikembangkan di beberapa Negara untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah pedalaman antara lain Peltric Set di Nepal, Columbian Alternator System di Kolombia, dan Pico Power Pack di Amerika. Ketiga sistem tersebut menggunakan turbin impuls sebagai penggerak generator (Maher dkk.,2001).

Kwalitas aliran jet yang dihasilkan oleh nozel dapat mempengaruhi kinerja nozel dapat mempengaruhi kinerja turbin. Penelitian tentang kasus ini dilakukan oleh Kvicinsky dkk (2002), dimana analisis aliran jet pada permukaan sudu turbin dilakukan secara numerik maupun eksperimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas aliran jet berpengaruh pada distribusi tekanan dan medan kecepatan pada permukaan sudu sehingga daya dan efisiensi turbin akan berubah.

Staubli dan Hauser (2004) menggambarkan aliran jet keluar nozel berpenampang lingkaran dalam berbagai bentuk divergensi dengan cara memodifikasi dalam berbagai sudut jarum governor pada nozel. Divergensi jet ternyata berpengaruh terhadap karakteristik jet pada permukaan sudu. Hasil modifikasi menunjukkan perubahan positif kinerja turbin, yang berarti modifikasi geometri nozel dapat menambah kualitas aliran jet yang dihasilkan nozel.



Gambar : 2.1 Perbandingan Karakteristik Turbin

(Staubli,Hauser.2004).

2.2 Turbin Pelton

Turbin pelton merupakan pengembangan dari turbin impuls yang ditemukan oleh *S.N. Knight* tahun 1872 dan *N.J. Colena* tahun 1873 dengan pasang bucket pada roda turbin. Setelah itu turbin impuls dikembangkan oleh orang amerika *Lester G. Pelton* (1880) yang melakukan perbaikan dengan penerapan bucket ganda simetris, punggung membelah membagi jet menjadi dua paruh yang sama yang dibalikkan menyamping.

Jenis turbin ini memiliki satu atau beberapa jet penyemprot air untuk memutar piringan. Tak seperti turbin jenis reaksi, turbin ini tidak memerlukan tabung diffuser. Ketinggian air (head) = 200 – 2000 meter. Debit air = 4 – 15 m³/s. Turbin pelton digolongkan ke dalam jenis turbin impuls atau tekanan sama. Karena selama mengalir di sepanjang sudu-sudu turbin tidak terjadi penurunan tekanan, sedangkan perubahan seluruhnya terjadi pada bagian pengarah nozel. Energi yang masuk ke roda jalan bentuk energi kinetik.

Turbin pelton yang bekerja dengan prinsip impuls, semua energi tinggi dan tekanan ketika masuk ke bucket jalan turbin dirubah menjadi energi kecepatan. Pancaran air tersebut yang akan menjadi gaya tangensial F yang bekerja pada bucket roda jalan. Turbin pelton beroperasi pada tinggi jatuh yang besar. Tinggi air jatuh dihitung mulai dari permukaan atas sampai tengah-tengah pancaran air.

Bentuk bucket terbelah menjadi dua bagian yang simetris, dengan maksud adalah agar dapat membalikkan pancaran air dengan baik dan membebaskan bucket dari gaya-gaya samping.

2.2.1 Komponen-Komponen Utama Turbin Pelton

Dilihat dari desainnya, turbin pelton memiliki tiga komponen utama yaitu:

a. Rumah Turbin

Rumah Turbin merupakan komponen yang paling utama dari turbin pelton karena dalam kinerjanya komponen ini berfungsi sebagai tempat kedudukan *runner* dan penahan air yang keluar dari sudu-sudu turbin. Agar *runner* tidak terendam, rumah turbin harus

memiliki desain yang cukup tinggi diatas muka air. Konstruksinya harus cukup kuat untuk perlindungan dari kemungkinan bucket, sudu maupun *runner* yang rusak dan terlempar saat turbin beroperasi.



Gambar : 2.2 Rumah Turbin Pelton Skala Laboratorium (*Suyesh, 2019*).

b. Nozel

Nozel berfungsi untuk mengarahkan pancaran air ke sudu-sudu turbin yang diperoleh dari banyaknya kapasitas air yang masuk ke turbin. Pada turbin pelton dikonstruksikan dengan satu nozel atau lebih dengan memperhatikan porosnya. Poros mendatar dilengkapi satu atau dua nozel, sedangkan turbin pelto yang berporos tegak mempunyai sampai 6 buah nozel. Ukuran nozel yang sesuai dapat memutar sudu lebih baik sehingga dapat meningkatkan efesiensi, daya dan torsi turbin. Dengan meningkatnnya efesiensi turbin maka dapat meningkatkan energi yang dihasilkan sehingga turbin air mampu menghasilkan kinerja yang optimal dengan menggunakan energi yang minimal.



Gambar : 2.3 Nozel Turbin Pelton (*Mochtadin, 2019*).

c. Sudu Turbin

Sudu turbin ini berbentuk seperti bucket berjumlah banyak dan dipasang disekeliling *runner*. Setiap pemotongan pancaran air yang disebabkan oleh bucket pada umumnya berdasarkan gangguan atas pancaran tersebut. Sehingga secara mendadak dan tanpa diinginkan sebagian aliran membentur sudu dan terbelokkan. Biasanya untuk menambah panjangnya usia *runner*, digunakan bahan dalam pembuatan sudu yang lebih baik mutu dan kualitasnya, misalnya baja tahan karat.



Gambar : 2.4. Sudu Turbin Pelton (Mochtadin, 2019).

2.2.2 Kelebihan Turbin Pelton

Kelebihan Turbin Pelton, yaitu :

- a. Daya yang dihasilkan besar.
- b. Kontruksi yang sederhana.
- c. Mudah dalam perawatan dan teknologi yang sederhana mudah ditetapkan di daerah yang terisolir.

2.2.3 Kelemahan Turbin Pelton

Karena aliran air berasal dari atas maka biasanya reservoir air atau bendungan air, sehingga memerlukan investasi yang lebih banyak. Menurut penelitian dari Pamungkas Irawan tentang ifisiensi dari bentuk silinder tertutup dibelah dua dapat disimpulkan sebagai berikut :

Besarnya daya yang dihasilkan oleh sistem dipengaruhi oleh head (H), debit (Q), percepatan gravitasi (g) dan pembebanan generator pada tegangan yang konstan.

2.3 Prinsip Dasar dan Cara Kerja Turbin Pelton

2.3.1 Prinsip Dasar

Turbin pelton merupakan turbin impuls yang prinsip kerjanya mengubah energi potensial air menjadi energi kinetik dalam bentuk pancaran air. Pancaran air yang keluar dari mulut nozel diterima oleh bucket-bucket pada roda jalan sehingga roda jalan berputar. Dari putaran inilah menghasilkan energi mekanik yang memutar poros generator sehingga menghasilkan energi listrik.

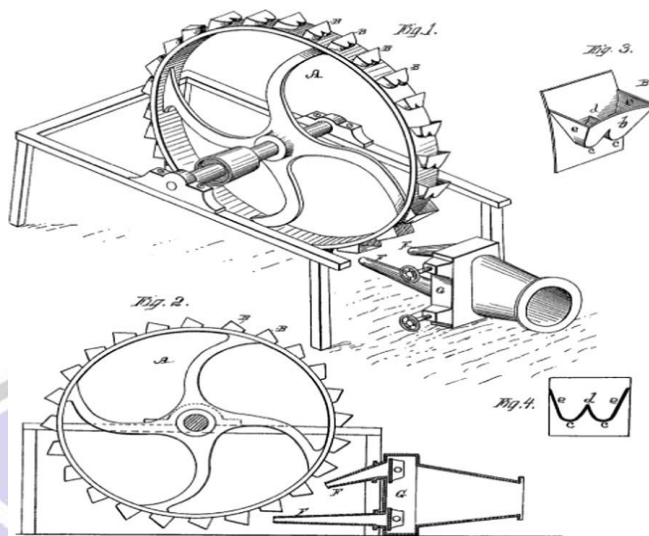
2.3.2 Cara Kerja Turbin Pelton

Adapun cara kerja turbin pelton ini adalah tahap pertama yang dilakukan adalah menghidupkan saklar motor pompa yang terdapat panel listrik yang bertujuan agar pompa berputar dan menghisap air yang berada pada bak penampung, lalu air mengalir melalui pipa menuju ke nozel penyemprot. Sebelum sampai ke nozel air terlebih dahulu melewati kran dan juga alat ukur flow meter. Dan dari nozel lalu air disemprotkan ke sudu turbin yang menyebabkan turbin serta as turbin berputar, dan air yang disemprotkan oleh nozel ke sudu itu jatuh kembali pada bak penampung air.

2.4 Penelitian Sebelumnya

2.4.1 Pengembangan Turbin Pelton Pra-CFD

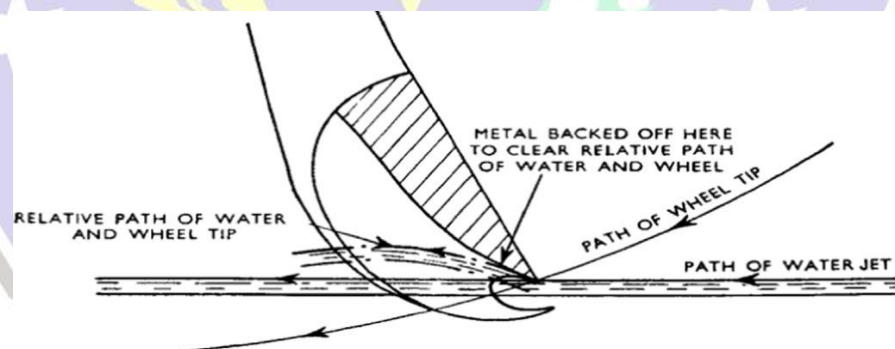
Turbin pelton atau roda pelton ditemukan oleh Lester A. Pelton pada tahun 1880 dan diikuti beberapa modifikasi yang diterbitkan pada abad yang sama. Turbin Impuls yang tersedia sebelum waktu itu sangat tidak efisien. Turbin pelton pertama ditampilkan pada gambar di bawah ini.



Gambar : 2.5 Ilustrasi roda pelton pertama (Staubli,Hauser.2004).

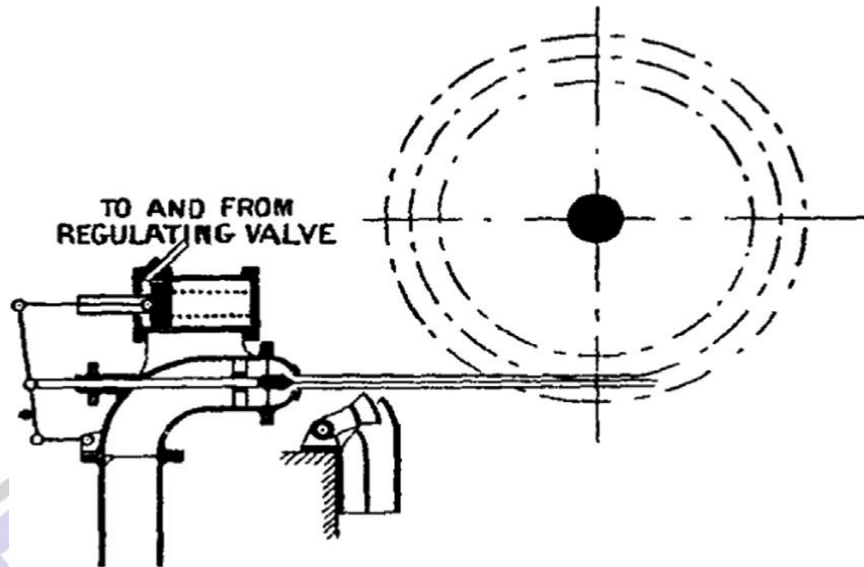
Terdiri dari bucket berbentuk persegi panjang yang memiliki pembagi di tengah untuk membagi jet secara simetris menjadi dua aliran dan mempengaruhi aliran balik hampir sepanjang tahun 1801. Namun, bucket pertama turbin pelton tidak memiliki potongan selalu hadir dalam desain modern Pelton dan desain injector sangat sederhana.

Pada paruh pertama abad ke 20, turbin pelton telah berkembang menjadi sesuatu yang lebih mirip dengan tampilannya saat ini. Ada publikasi yang tersedia menunjukkan bentuk bucket yang memiliki potongan seperti gambar di bawah ini.



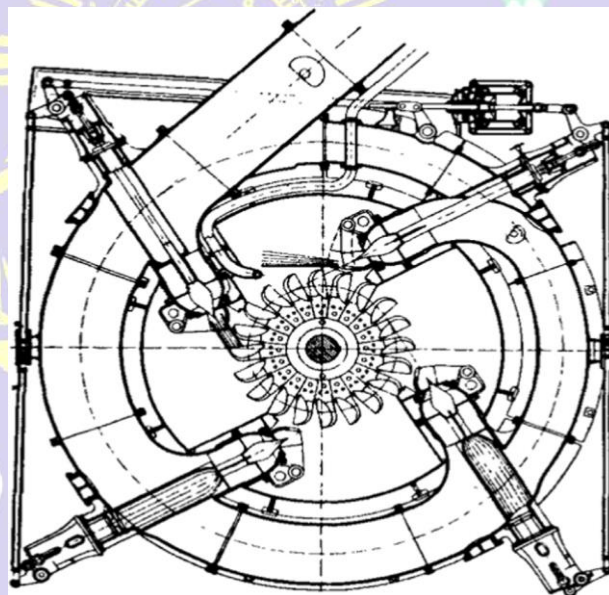
Gambar : 2.6 Sketsa bucket yang memiliki potongan diterbitkan pada tahun 1937 (Staubli,Hauser.2004).

Desain injector yang mencakup katup tombak seperti gambar di bawah ini.



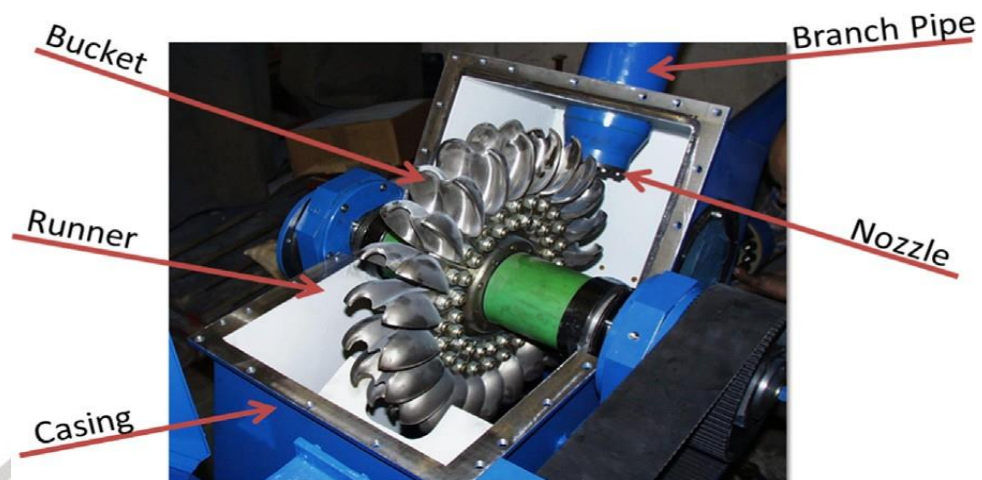
Gambar : 2.7 Sketsa nozel yang dikendalikan oleh katup tombak diterbitkan pada tahun 1991 (Staubli,Hauser.2004).

Dan pengaturan turbin multi-jet untuk operasi poros vertical seperti gambar di bawah ini.



Gambar : 2.8 Sketsa poros vertikal multi-jet pelton diterbitkan pada tahun 1937 (Staubli,Hauser.2004).

Tata letak turbin pelton modern yang khas disediakan seperti gambar di bawah ini.



Gambar : 2.9 Tata letak khas turbin pelton modern (Staubli,Hauser.2004).

Keterangan :

a. Runner

Runner turbin pelton pada dasarnya terdiri atas piringan dan sejumlah bucket yang terpasang di sekelilingnya. Piringan terpasang pada poros dengan sambungan pasak dan stopper.

b. Bucket

Bucket pelton atau biasa disebut sudu yang berbentuk dua buah bucket. Bucket didesain menggunakan perbandingan dari gambar 2.7. hal ini berarti bahwa desain dilakukan berdasarkan gambar. Bucket berfungsi membagi pancaran menjadi dua bagian. Gaya pada bucket berasal dari pancaran air yang keluar dari nozel, yang dibalikkan setelah membentur sudu, arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum sudu. Arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum. Gaya ilmiah yang disebut gaya impuls. Gambar 2.7 menunjukkan pola dari bucket pelton. Desain dikonstruksi dari bentuk geometric yang sederhana, dan pola tuangan dapat dibuat dari penggambaran.

Proses terbaik untuk pembuatan bucket pelton adalah penuangan/casting. Keuntungan dari proses penuangan adalah

murah. Dan dapat menghasilkan bentuk kompleks secara cepat. Sifat-sifat material yang dibutuhkan dalam pembuatan bucket yaitu kuat, resisten terhadap abrasi, cocok untuk penuangan dan tahan terhadap penggunaan pada air. Contoh material meliputi :

- 1) Aluminium.
- 2) Logam campuran tembaga.
- 3) Besi tuang abu-abu.
- 4) Baja.
- 5) Plastic.
- 6) Baja lembaran.
- 7) Resin.

c. Casing

Casing turbin pelton merupakan bagian terpenting di turbin pelton, casing merupakan suatu konstruksi untuk menopang seluruh bagian-bagian terpenting pada turbin pelton.

d. Nozel

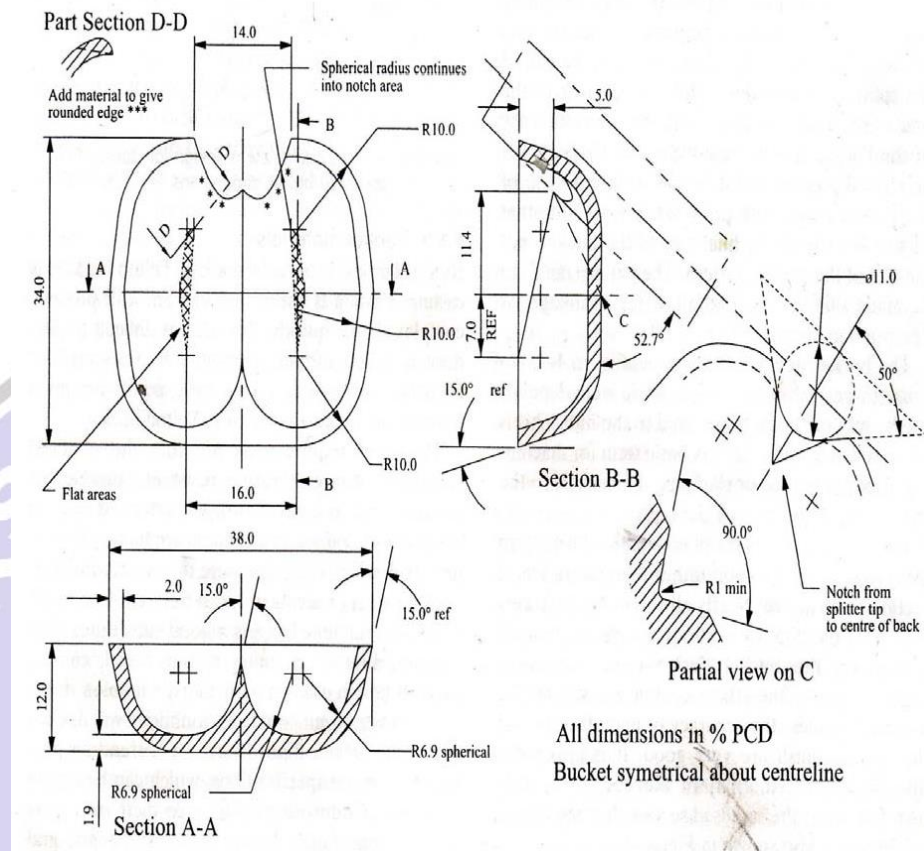
Nozel merupakan bagian dari turbin yang sangat penting, yang berfungsi sebagai pemancar aliran air untuk menyembrot ke arah sudu-sudu turbin. Kecepatan air meningkat disebabkan oleh nozel, air yang keluar dari nozel yang mempunyai kecepatan tinggi akan membentur sudu turbin, setelah membentur sudu arah kecepatan aliran berubah sehingga terjadi perubahan momentum.

e. Branch Pipe

Branch Pipe atau biasa disebut pipa cabang yaitu pipa yang berfungsi sebagai mengalirkan air ke nozel untuk disemprotkan ke bucket turbin pelton.

Terlihat bahwa bentuk bucket telah berkembang menjadi bentuk bulat yang lebih halus untuk mengurangi kehilangan aliran di dalamnya. Selain itu, bucket memiliki potongan yang memastikan transisi yang lebih baik saat jet berpindah dari satu bucket ke bucket lainnya. Selain

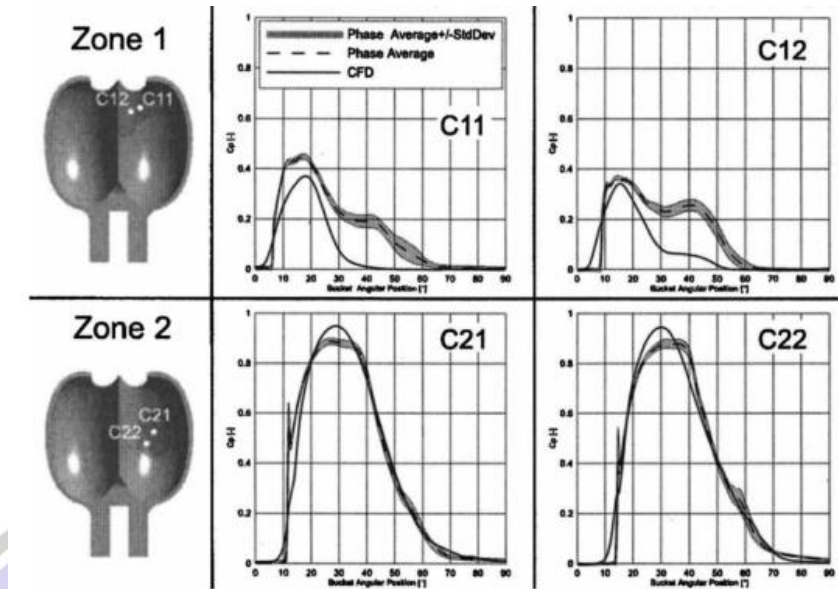
itu, injector berisi nozel dan katup tombak untuk mengontrol laju aliran dan menjaga kualitas jet yang baik (Audrius Zidonis, dkk., 2014).



Gambar : 2.10 Desain Bucket (Thakei, 2004, Hal.33).

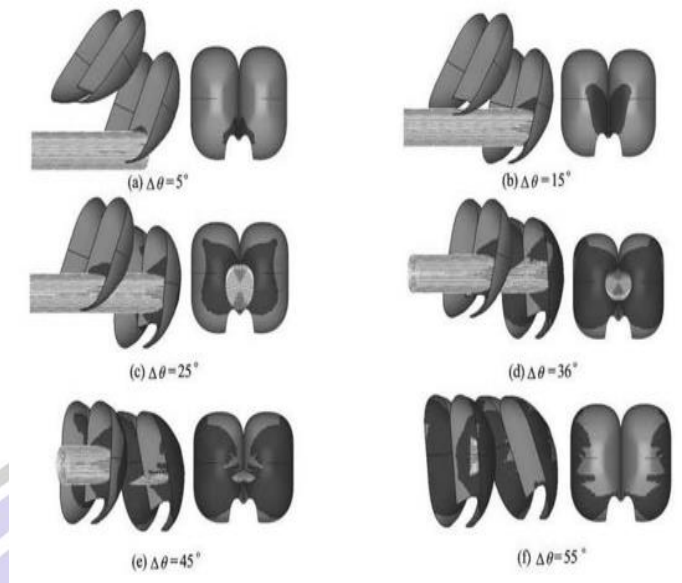
2.4.2 Pengembangan Turbin Pelton Pasca-CFD

Bhattarai Suyesh dkk, (2019) melakukan penelitian tentang variasi baru dalam teknik pemodelan bucket turbin pelton untuk meningkatkan produksi energi terbarukan dengan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Hasil dari penelitian ini adalah dengan desain *bucket Elliptic* yang telah divariasi desain panjang, lebar dan kedalamannya dapat meningkatkan efisiensi sebesar 6,8% dan otomatis akan meningkatkan daya yang diperoleh dari turbin air tersebut.



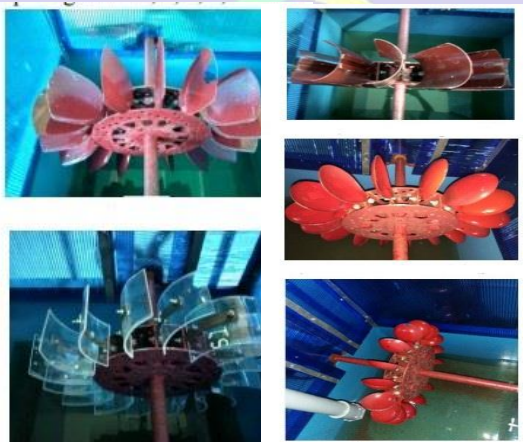
Gambar : 2.11 Simulasi CFD desain bucket *Elliptic* (Suyesh, 2019).

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Anagnostopoulus John S. dkk, (2012). Peneliti menggunakan metode simulasi Lagrangian cepat untuk menganalisis aliran dan desain *runner* pada turbin pelton. Sistem pengumpanan terdiri dari dua injektor dengan diameter nozel 0,036 m dan diameter semburan maksimum pada *Vena Contracta* sekitar 0,031 m. Air disuplai dengan kecepatan variabel 3 tahap berdaya 220 kW pompa sentrifugal dan sirkulasi air melalui 300 m³ pada tangki air Laboratorium, titik operasi desain *runner* adalah 270,6 m³/h untuk *head net* 129,6 m, pada kecepatan 1.150 Rpm serta dengan posisi sudut sudu turbin sebesar 36°. Dari penelitian tersebut dapat dicapai secara keseluruhan efisiensi sekitar 82%.



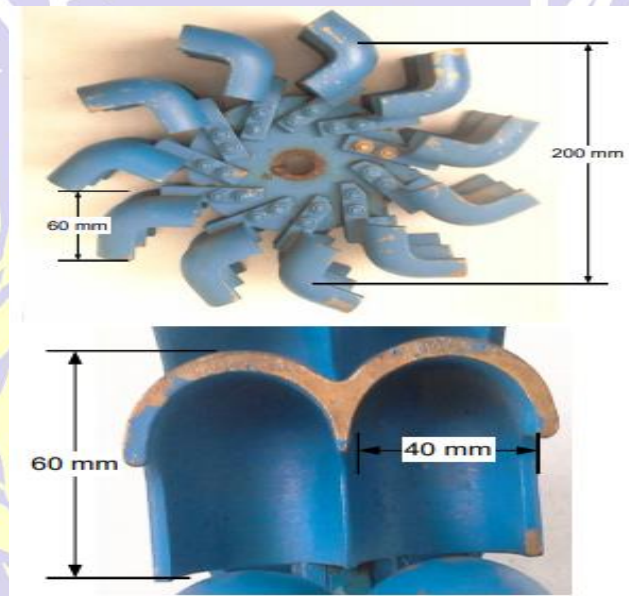
Gambar : 2.12 Variasi Sudut (*John, 2012*).

Ahmad Yani (2017) membuat rancang bangun alat praktikum turbin air dengan pengujian bentuk sudu terhadap torsi dan daya turbin yang dihasilkan menggunakan metode eksperimen. Peneln ini mevariasikan bentuk sudu diantaranya terdiri dari sudu datar, sudu lengkung, sudu sudu setengah silinder, sudu sendok nasi, dan sudu sendok sayur. Selain itu peneliti juga mengontrol putaran turbin dari 350 Rpm, 300 Rpm, 250 Rpm, 200 Rpm, 150 Rpm, 100 Rpm, 50 Rpm dan 0 Rpm. Hasilnya didapat Torsi turbin maksimum terjadi pada sudu sendok sayur dengan nilai sebesar 0,555 Nm dan daya turbin maksimum terjadi pada sudu sendok sayur dengan nilai sebesar 5,652 Watt.



Gambar 2.13 Variasi Sudu (*Ahmad Yani, 2017*).

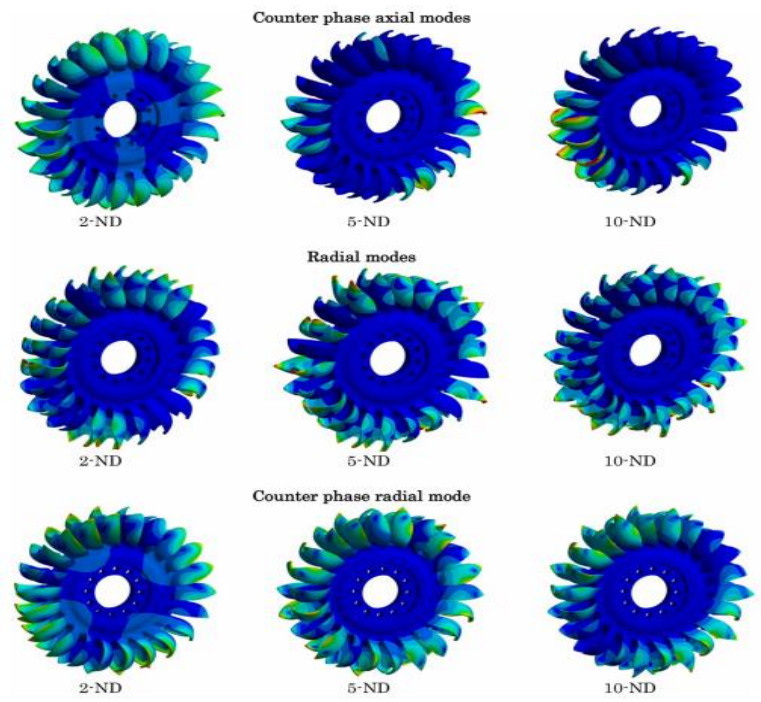
Priangkos T. dkk (2017) melakukan pengujian efisiensi turbin pelton dengan sudu setengah pipa elbow. Peneliti menggunakan metode eksperimen dengan variasi menggunakan 3 (tiga) nozel dengan diameter 12, 13, dan 14 mm dengan sudut 90 derajat terhadap sudu turbin. Efisiensi turbin Pelton setengah lingkaran siku memberikan efisiensi lebih baik pada penggunaan nozel dengan diameter yang lebih besar dan pada daya hidrolik yang lebih besar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa efisiensi dipengaruhi oleh ukuran diameter nozel, daya hidrolik yang diterima turbin, dan beban yang diberikan kepada turbin.



Gambar : 2.14 Bentuk Sudu (Priangkos T. dkk, 2017).

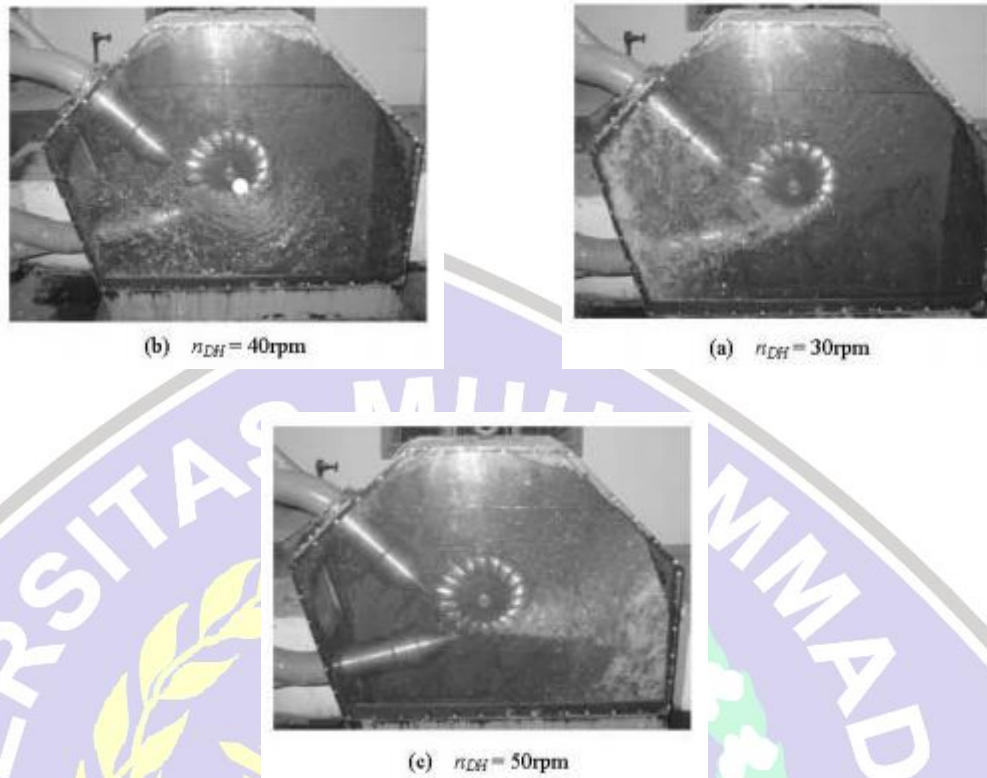
Egusquiza M. dkk, (2020) dengan metode eksperimen dan analisa numerik melakukan penelitian prototype mengenai respon dinamis pelton *runners*. Variasi yang digunakan berupa Bentuk model aksial, tangensial, dan counter pass dari pelton dengan dua (2-ND), lima (5-ND) dan sepuluh (10-ND) diameter nodal. Beberapa kesimpulan dapat diambil yaitu peningkatan diameter simpul piringan dari 2 ND menjadi 4 ND terjadi untuk mengurangi sebagian besar massa getar piringan, yang menjelaskan perbedaan besar antara frekuensi pertama dan untuk mode lebih tinggi dari 5 ND deformasi disk sangat kecil sehingga

hampir tidak menunjukkan variasi, bahkan jika jumlah diameter nodal ditingkatkan.



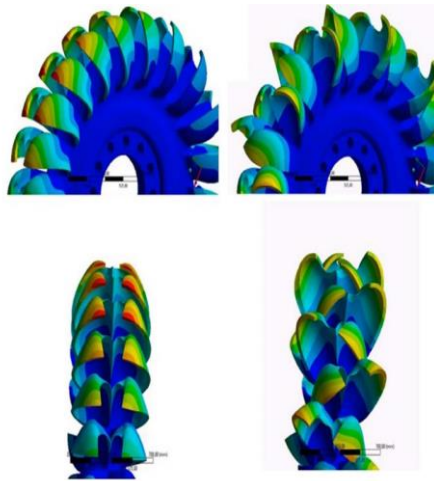
Gambar : 2.15 Variasi bentuk model sudu turbin (Egusquiza M. dkk 2020).

Chavez J. C. dkk, (2014) melakukan analisis kegagalan impeller pelton dengan menggunakan metode simulasi CFD dan model numerik. Variasi dalam penelitian ini diantaranya berupa analisa mikroskopik pada impeller, analisa micro structural, analisis permukaan rekahan, status beban, pengujian terhadap tegangan dan kalkulasi pada factor keamanan. Dari analisis ini didapatkan hasil bidang tekanan yang dihasilkan oleh interaksi antara fluida dan ember. Bidang tekanan memungkinkan penghitungan kondisi beban dengan margin kesalahan 3% dalam nilai torsi sehubungan dengan nilai eksperimen. Analisis elemen hingga memungkinkan pembentukan keadaan stres yang mana *impeller* terkena selama operasi dan titik kritis di leher zona *bucket* diidentifikasi, bertepatan dengan retakan yang ditemukan. Zona ini berada di bawah tegangan tarik karena efeknya dari gaya sentrifugal dan kompresi saat ember bersentuhan dengan jet, menyebabkan kelelahan. Faktor keamanan dihitung pada 1, 37 dan 1, 02.



Gambar : 2.17 Aliran Air Dinamis Didalam Model Tes Turbin Pelton (Xiang Y. X. dkk,2007).

Egusquiza M. dkk, (2018) dengan metode simulasi metode numerik (FEM) melakukan pemantauan kondisi lanjutan turbin pelton yang telah beroperasi. Dalam melakukan pemantauan kondisi digunakan variasi pita sub-sinkron ($1-0,8$ dst) untuk masalah bantalan, pita di sekitar frekuensi putar ($0,8-1,8$ ff) untuk mendeteksi ketidakseimbangan, pita untuk ketidaksejajaran ($1,8-3,8$ ff), pita untuk keausan bantalan dan eksitasi rotor alami frekuensi (3.8 hingga $f_p - 1.8ff$), pita di sekitar frekuensi lewat blade ($f_p \pm 1.8ff$). Hasilnya dari jenis kerusakan utama yang ditemukan pada mesin (erosi pasir, kebengkokan atau kavitasi), yang paling berbahaya adalah kebengkokan, sering kali disebabkan oleh ketidaksejajaran jet, yang dapat menyebabkan *bucket runner* rusak.



Gambar : 2.18 Perbedaan Efek Penempatan Jet Sejajar Dan Tidak Sejajar (*Egusquiza M. dkk,2018*).

Egusquiza M. dkk (2017) melakukan investigasi kegagalan turbin pelton *runners* dengan menggunakan metode numeric FEM dan analisis EMA. Dalam penelitian ini menggunakan variasi rentang frekuensi pita lebar 100–140 Hz dan 450–600 Hz yang menunjukkan eksitasi frekuensi alami. Dengan amplitudo yang jauh lebih rendah menggunakan pita 600–700 Hz serta menggunakan variasi sudut tangensial atau mode bending, mode aksial dan mode torsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa centered jet menghasilkan distribusi tegangan yang simetris dengan maksimum pada root splitter. Jet yang tidak sejajar menunjukkan tegangan asimetris. Respons dinamis *runner* pada 220 Hz (distribusi tegangan) dengan jet terpusat.

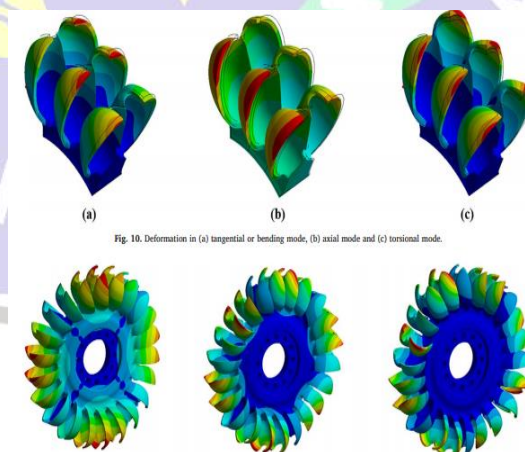


Fig. 10. Deformation in (a) tangential or bending mode, (b) axial mode and (c) torsional mode.

Gambar : 2.19 Investigasi Variasi Sudu (*Egusquiza M. dkk 2017*).

Cobb B. R. dkk (2013) melalui metode eksperimen melakukan penelitian tentang Karakteristik kinerja turbin impuls (Turgo dan Pelton) dan dampaknya terhadap instalasi pico-hydro. Variasi yang digunakan peneliti tersebut merupakan perbandingan kinerja antara model turbin turgo dan turbin pelton. Untuk turbin impuls, rasio kecepatan yang tepat (rasio sekitar 0.4e0.5) sangat penting untuk transfer energi yang efisien dari semburan air ke poros generator. Secara teoritis, titik efisiensi puncak untuk turbin Turgo harus terjadi pada kira-kira $\times \frac{1}{4}$ 0,53 untuk sudut jet 20. Secara eksperimental, efisiensi puncak terjadi pada rasio kecepatan yang sedikit lebih rendah, kira-kira 0,46e0,48. Demikian pula, titik efisiensi puncak teoritis untuk Pelton adalah pada rasio kecepatan 0,50, tetapi secara eksperimental mendekati 0,41. Pertimbangan kedua yang berkaitan dengan rasio kecepatan adalah pergeseran titik efisiensi puncak untuk sistem dengan efisiensi turbin rendah.



Gambar : 2.20 Perbedaan Model Sudu Turbin Turgo Dan Turbin Pelton (Cobb B. R. dkk 2013).

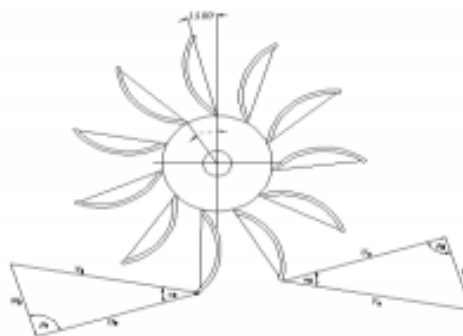
Audrius Z. dkk (2015) meneliti tentang Optimasi parametrik dari dua desain runner turbin Pelton menggunakan CFD. Peneliti memvariasikan dua desain runner turbin pelton yaitu dengan desain initial dan optimum. Hasil dari simulasi sangat konsisten satu sama lain dan kesalahan perhitungan meskipun relatif kecil mempengaruhi hasil. Pengaruh parameter geometris yang paling penting dari runner terhadap nilai efisiensi relatifnya, diselidiki dan disimpulkan bahwa umumnya tidak tergantung pada kecepatan spesifik maupun desain model, melainkan kemiringan yang sama pada grafik parameter terhadap efisiensi untuk dua spesifik. Di sisi lain, nilai optimal yaitu, nilai pada

titik pada grafik efisiensi maksimum, untuk setiap parameter terpenting tampaknya sangat bergantung pada kecepatan tertentu. Reslutan efisiensi dari model initial mencapai 100% sedangkan untuk model optimum mencapai 106,8%.



Gambar : 2.21 Dua Desain *runner* Turbin Pelton (Audrius Z. dkk 2015).

Lalu penelitian selanjutnya dari Pietersz R. dkk (2013) meneliti tentang pengaruh jumlah sudu terhadap optimalisasi kinerja turbin kinetik roda tunggal. Dengan metode simulasi peneliti menggunakan sudu turbin kinetik berbentuk sudu bucket yang divariasikan jumlahnya yaitu 5, 7, 9 dan 11. Dalam penelitian ini juga, debit air divariasikan sebesar $45 \text{ m}^3/\text{s}$, $50 \text{ m}^3/\text{s}$, $55 \text{ m}^3/\text{s}$, dan $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Hasil maksimum turbin yang diperoleh yaitu terjadi divariasasi sudu berjumlah 11 dengan daya sebesar 20,41 watt, tingkat efisiensi sebesar 71,42%, dan torsi sebesar 3,73 Nm.

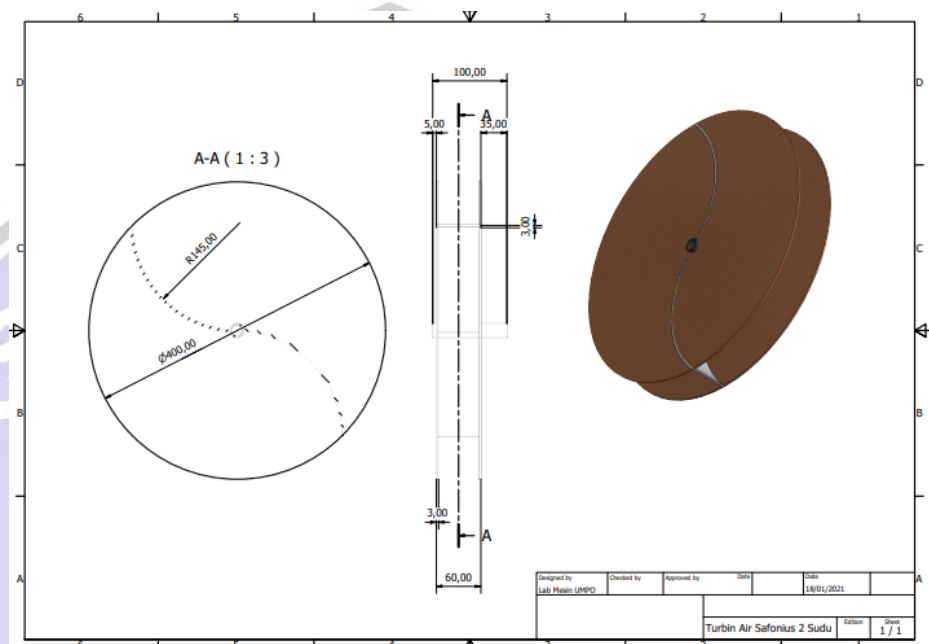


Gambar : 2.22 Desain Bentuk Dan Sudut Sudu Turbin Pelton (Pietersz R. dkk 2013).

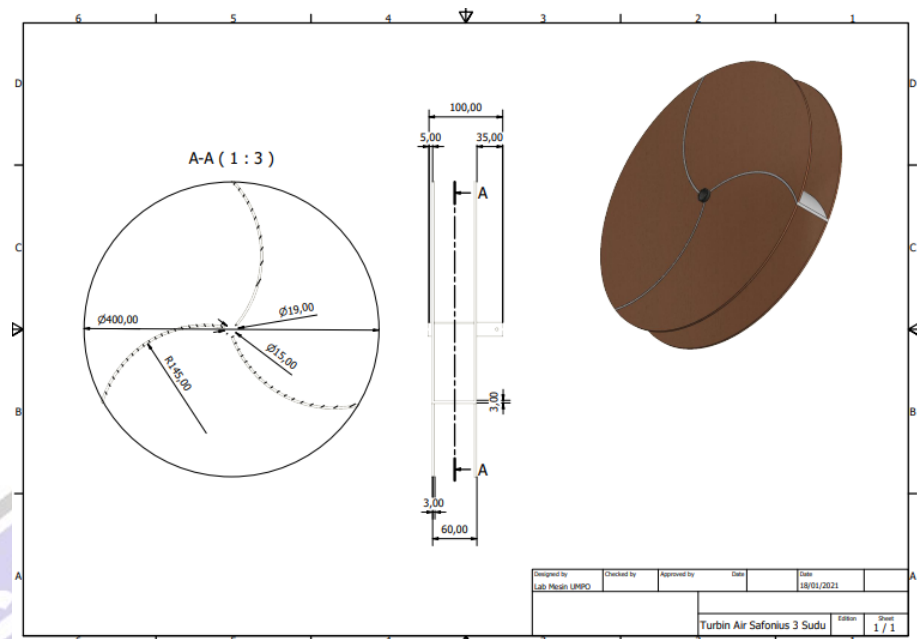
2.4.3 Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Jumlah Sudu Terhadap Performa Turbin Air Tipe Savonius

Penelitian tentang turbin Savonius telah banyak dibuat dengan bertujuan menaikkan performa dan daya yang di ciptakan. Beberapa riset yang dilaksanakan salah satunya adalah pengaruh sudut sudu turbin. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa perubahan parameter sudu seperti *overlap ratio*, *aspect ratio*, bentuk sudu dan sebagainya mampu mempengaruhi performa turbin. Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Soelaiman dkk. (2007) dengan penelitian tentang perbandingan bentuk sudu Savonius tipe U dan tipe L memperlihatkan hingga sudu Savonius tipe L menciptakan torsi yang lebih baik dibandingkan dengan sudu Savonius tipe U. Mahmoud dkk. (2012), telah melakukan penelitian dengan menggunakan turbin Savonius yang sudunya berjumlah tujuh yang di pakai dalam gelombang air laut. *End-plate* pada turbin Savonius dapat mempengaruhi dari turbin tersebut. Turbin Savonius dengan *end-plate* memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa *end-plate*. Selanjutnya penelitian dilakukan oleh Purnama dkk. (2013) dengan melakukan penelitian tentang turbin poros vertikal tipe Savonius menggunakan pamandu arah aliran. Turbin ini diuji pada aliran sungai dengan dan tanpa penggunaan pamandu arah. Hasilnya penambahan pamandu arah pada turbin Savonius akan menambah putaran rotor turbin sebesar 27,28% beserta peningkatan daya keluaran dari generator rata-rata sebesar 31,04%. Penelitian selanjutnya dilakukan oleh Imron Hamzah dkk. (2016) mengenai Studi Pengaruh Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja *Savonius Water Turbine* Pada Pipa Aliran Dalam Pipa. Menggunakan variasi jumlah sudu 2, 4, 6, 8, 10, 12. Dimensi turbin : Diameter rotor (D) = $\varnothing 82 \text{ mm}$: tinggi rotor (h) 82 mm. Menyimpulkan maka pengaruh jumlah sudu pada turbin Savonius kian banyak jumlah sudu nilai torsi yang akan dihasilkan bertambah kecil dan jumlah sudu terbaik pada turbin Savonius adalah 2 sudu. Demikian juga penelitian yang dilakukan oleh Alit dkk. (2019), dengan penelitian tentang pengaruh jumlah sudu dan

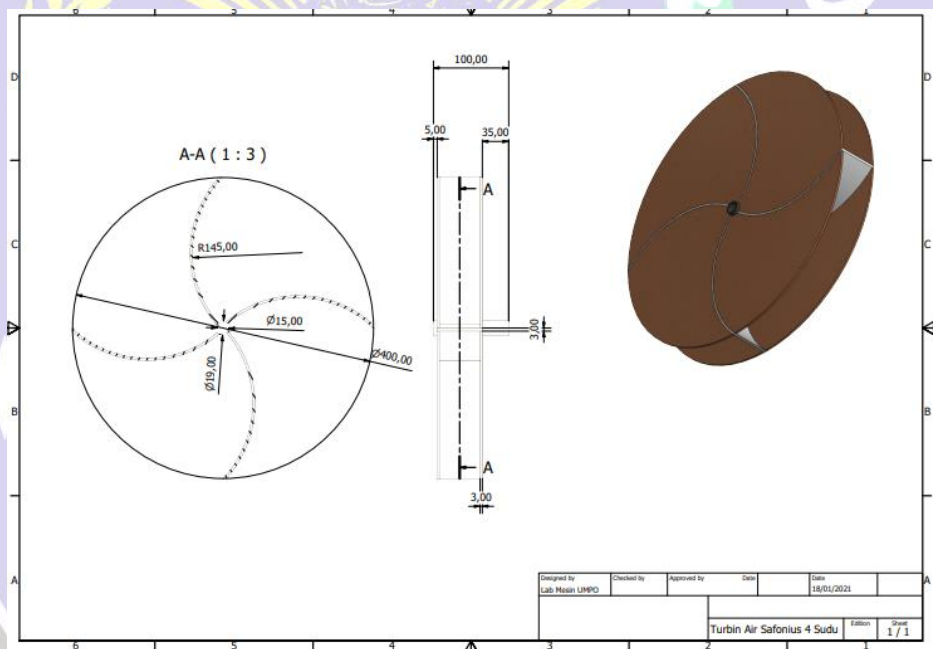
penambahan konsentrator pada turbin Savonius dan diuji pada aliran irigasi. Jumlah sudu yang digunakan antar lain yaitu 2, 3, dan 4 sudu. Hasil dari jumlah sudu 3 buah menghasilkan daya tertinggi, dan penambahan konsentrator mampu menambah performa turbin. Berikut ini adalah gambar desain turbin air Savonius :



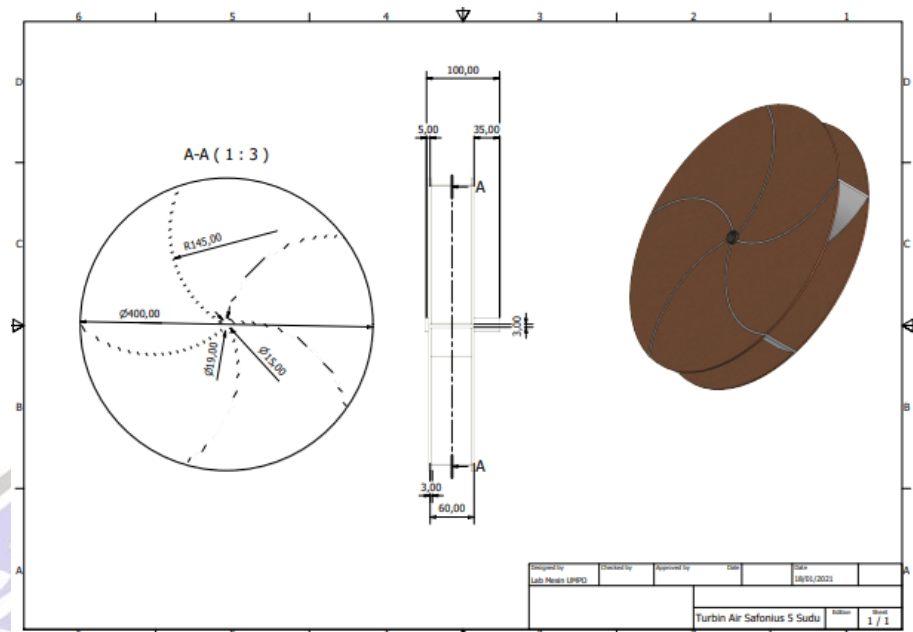
Gambar : 2.23 Variasi Turbin Air Savonius 2 sudu (Gilang R. dkk 2020).



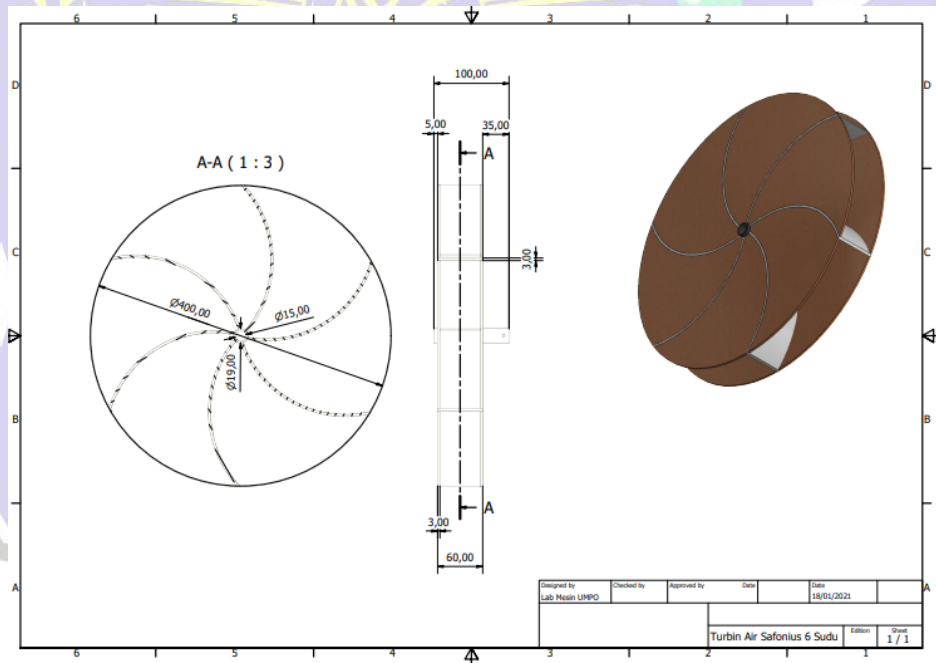
Gambar : 2.24 Variasi Turbin Air Savonius 3 sudu (Gilang R. dkk 2020).



Gambar : 2.25 Variasi Turbin Air Savonius 4 sudu (Gilang R. dkk 2020).



Gambar : 2.26 Variasi Turbin Air Savonius 5 sudu (Gilang R. dkk 2020).



Gambar : 2.27 Variasi Turbin Air Savonius 6 sudu (Gilang R. dkk 2020).

Data Hasil Pengujian ini dapat dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Ponorogo. Dilihat pada tabel di bawah ini selanjutnya dilakukan analisa atau perhitungan yang hasilnya disajikan dalam bentuk grafik.

Tabel 2.1 Data hasil rata-rata variasi 2 sudu (*Gilang Pratama dkk.2020*).

NO	RPM	EFISIENSI	KOEFISIEN TORSI
1	72	3.84354	0.01148
2	86.2	3.16618	0.00766
3	165	2.58957	0.00515
4	172.6	2.15955	0.00409
5	147.6	1.92779	0.00308

Tabel 2.2 Data hasil rata-rata variasi 3 sudu (*Gilang Pratama dkk.2020*).

NO	RPM	EFISIENSI	KOEFISIEN TORSI
1	86.6	3.93878	0.01176
2	126.8	3.2828	0.00794
3	173.4	2.74373	0.00546
4	200.8	2.3525	0.00446

Tabel 2.3 Data hasil rata-rata variasi 4 sudu (*Gilang Pratama dkk.2020*).

NO	RPM	EFISIENSI	KOEFISIEN TORSI
1	92.4	3.57143	0.01066
2	140.8	3.26531	0.0079
3	204.8	2.63946	0.00525
4	217.4	2.16698	0.0041

Tabel 2.4 Data hasil rata-rata variasi 5 sudu (*Gilang Pratama dkk.2020*).

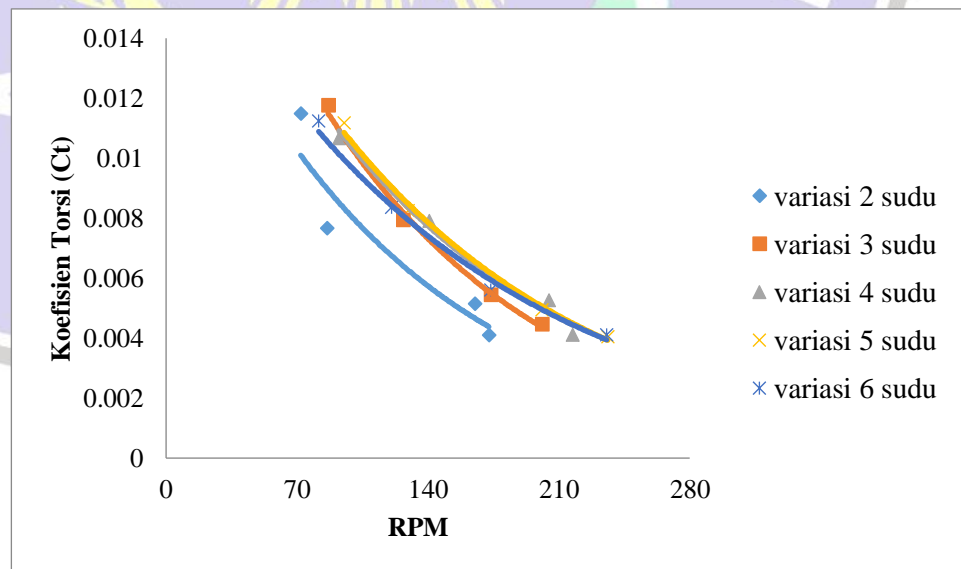
NO	RPM	EFISIENSI	KOEFISIEN TORSI
1	95.2	3.7415	0.01117
2	129.4	3.41108	0.00825
3	200.8	2.47619	0.00493
4	236.2	2.13358	0.00404

Tabel 2.5 Data hasil rata-rata variasi 6 sudu (*Gilang Pratama dkk.2020*).

NO	RPM	EFISIENSI	KOEFISIEN TORSI
1	81.6	3.7619	0.01123
2	120.6	3.4519	0.00835
3	173.4	2.80726	0.00559
4	235.6	2.16327	0.0041

a. Performa Variasi Turbin Air Savonius

Hubungan antar Rpm dengan Koefisien Torsi (C_t) Eksperimen yang akan dilakukan mencari performa jumlah sudu turbin air Savonius yang dilihat dari besarnya koefisien torsi (C_t), pada grafik 2.1 menunjukkan grafik hubungan Rpm dengan C_t .



Grafik 2.1 Hubungan antara Rpm dengan Koefisien Torsi (*Gilang Pratama dkk.2020*).

Pada grafik 2.1 menunjukan bahwa turbin air Savonius variasi 2 sudu pada percobaan pertama dengan 72 RPM memperoleh hasil koefisien torsi sebesar 0,011448, pada percobaan kedua dengan 86,2 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00766, kemudian pada percobaan ketiga pada 165 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00515, dan kemudian percobaan keempat dengan 172,6 RPM memperoleh koefisien torsi sebesar 0,00308.

Kemudian hasil pengambilan data pada variasi 3 sudu, pada percobaan pertama dengan 86,6 RPM mendapat hasil koefisien torsi sebesar 0,01176, kemudian pada percobaan kedua dengan 126,8 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00794, pada percobaan ketiga dengan menggunakan 173,4 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00546, dan kemudian pada percobaan keempat dengan 200,8 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00446.

Selanjutnya hasil pengambilan data pada variasi 4 sudu pada percobaan pertama dengan 92,4 RPM memperoleh hasil sebesar 0,01066, pada percobaan kedua dengan menggunakan 140,8 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00794, kemudian pada percobaan ketiga dengan 204,8 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00525, dan selanjutnya pada percobaan keempat dengan 217,4 RPM memperoleh hasil sebesar 0,0041.

Kemudian pada hasil pengambilan data dengan variasi 5 sudu pada percobaan pertama dengan 95,2 RPM memperoleh hasil sebesar 0,01117, pada percobaan kedua pada 129,4 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00825, kemudian pada percobaan ketiga pada 200,8 Rpm memperoleh hasil sebesar 0,00493, dan kemudian pada percobaan keempat pada 236,2 RPM memperoleh hasil sebesar 0,00404.

Selanjutnya hasil pengambilan data dengan variasi 6 sudu pada percobaan pertama dengan 81,6 RPM memperoleh hasil sebesar 0,01123, pada percobaan kedua dengan 120,6 RPM

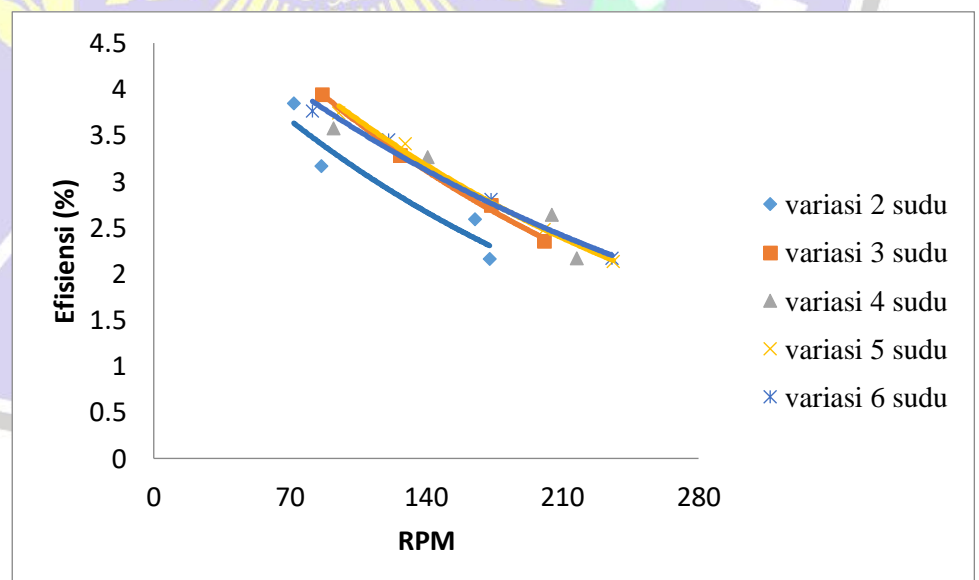
memperoleh hasil sebesar 0,00835, kemudian pada percobaan ketiga pada 173,4 RPM memperoleh hasil 0,00559, dan pada percobaan keempat dengan 235,6 RPM memperoleh hasil sebesar 0,0041.

Berdasarkan penjelasan grafik 2.1 diatas dapat disimpulkan bahwa pada variasi jumlah sudu hubungan antara RPM dengan koefisien torsi disimpulkan bahwa perubahan RPM semakin meningkat mengakibatkan koefisien torsi semakin menurun, hal ini dipengaruhi oleh besarnya torsi yang dihasilkan. Semakin besar torsi semakin besar juga koefisien torsinya.

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah sudu turbin air Savonius, nilai koefisien torsi yang dihasilkan semakin kecil. Nilai koefisien torsi tertinggi adalah 0,01176 pada RPM 86,6 dengan jumlah 3 sudu.

1) Hubungan antar Rpm dengan Efisiensi

Eksperimen yang akan dibahas selanjutnya adalah performa variasi jumlah sudu turbin air Savonius yang dilihat dari besarnya efisiensi. Grafik 2.2 adalah grafik hubungan antara Rpm dengan Efisiensi.



Grafik 2.2 Hubungan antara Rpm dengan Efisiensi (Gilang Pratama dkk.2020).

Pada grafik 4.2 diatas menunjukan bahwa turbin air Savonius variasi 2 sudu pada percobaan pertama dengan 72 RPM memperoleh hasil efisiensi sebesar 3,84 %, pada percobaan kedua dengan 86,2 RPM memperoleh hasil sebesar 3,16 %, kemudian pada percobaan ketiga dengan 165 RPM memperoleh hasil sebesar 2,58 %, dan pada percobaan keempat 172,6 RPM mendapatkan hasil sebesar 2,15%.

Hasil pengambilan data pada variasi 3 sudu pada pengujian pertama dengan 86,6 RPM mendapatkan hasil sebesar 3,93 %, pada percobaan kedua pada 126,8 RPM memperoleh hasil sebesar 3,28 %, selanjutnya pada percobaan ketiga dengan 173,4 RPM mendapatkan hasil sebesar 2,74 %, kemudian pada percobaan keempat dengan 200,8 RPM memperoleh hasil sebesar 2,35 %.

Pada hasil pengambilan data selanjutnya dengan variasi 4 sudu pada percobaan pertama dengan 92,4 RPM memperoleh hasil sebesar 3,57 %, pada percobaan kedua dengan menggunakan 140,8 RPM memperoleh hasil sebesar 3,26 %, pada percobaan ketiga dengan 204,8 RPM memperoleh hasil sebesar 2,63 %, kemudian pada percobaan keempat dengan menggunakan 217,4 RPM memperoleh hasil sebesar 2,16 %.

Hasil pengambilan data dengan variasi 5 sudu pada percobaan pertama dengan 95,2 RPM diperoleh hasil 3,7 %, pada percobaan kedua dengan 129,4 RPM memperoleh hasil sebesar 3,41 %, percobaan ketiga dengan 200,8 RPM memperoleh hasil sebesar 2,47 %, hasil percobaan keempat dengan 236,2 RPM memperoleh hasil sebesar 2,12 %.

Hasil pengambilan data dengan variasi 6 sudu pada percobaan pertama dengan 81,6 RPM diperoleh hasil 3,7 %, pada percobaan kedua dengan 120,6 RPM memperoleh hasil sebesar 3,4 %, percobaan ketiga dengan 173,4 RPM memperoleh hasil

sebesar 2,80 %, kemudian pada percobaan keempat dengan 235,6 RPM memperoleh hasil sebesar 1,85 %.

Berdasarkan penjelasan grafik 4.2 diatas dapat disimpulkan bahwa pada variasi jumlah sudu yang memiliki efisiensi tertinggi yaitu pada variasi 3 sudu yang memiliki efisiensi tertinggi dengan RPM 86,6 yaitu sebesar 3,93 %, dan efisiensi terendah terdapat pada variasi 5 sudu dengan RPM 236,2 dengan hasil sebesar 2,13 %. Diketahui efisiensi turbin dari tiap variasi tergolong rendah dikarenakan adanya kerugian gaya gesek, as turbin yang tidak stabil, dan aliran menyebar dan tidak terpusat pada sudu turbin.

2.5 Dasar Teori

2.5.1 Persamaan Energi

Persamaan energi dari prinsip unjuk kinerja turbin air adalah mengkonversi energi dari debit air yang dialirkan menjadi energi listrik. Dari pengertian tersebut dapat disimpulkan bahwa energi aliran air dapat diubah menjadi bentuk energy lainnya. Energi dalam aliran air dapat dibagi dalam beberapa bentuk (Fritz Dietzel, 1980), antara lain:

a. Energi Kinetik

Energi kinetik merupakan energi yang dimiliki oleh suatu benda akibat pengaruh pergerakannya, energi kinetik mempunyai massa m (kg) dan kecepatan v (m/s), dapat dirumuskan:

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

Ek = Energi kinetik (J)

m = Massa benda (kg)

v = Kecepatan (m/s)

b. Energi Potensial

Energi potensial adalah suatu energi yang muncul dikarenakan pengaruh gaya gravitasi bumi g (m/s^2) dan tinggi dari jatuhnya air h (m) yang berasal dari masa jenis (ρ) dengan fluida dan bisa dihitung dengan persamaan:

$$Ep = m \cdot g \cdot h \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

Ep = Energi potensial (J)

m = Massa benda (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s)

h = Ketinggian (m)

c. Hukum Kekekalan Energi

Ilmu fisika telah menerangkan hukum kekekalan energi dinyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, tetapi energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya tanpa merubah besar maupun jumlah energi baik sebagian maupun secara keseluruhan. Berikut adalah persamaan mekanik yang memiliki keterkaitan hubungan dengan hukum kekekalan energi (Halliday, 1991):

$$Em = Ep + Ek \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

Em = Energi mekanik (N.m)

Ep = Energi potensial (m/s^2)

Ek = Energi kinetik (J).

2.5.2 Parameter Kinerja Turbin Pelton

Langkah pertama dalam menentukan parameter kinerja dari turbin pelton adalah mencari terlebih dahulu hasil dari torsi (T) yang dihasilkan oleh turbin dengan rumus,

$$T = F \times r_{pulley} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana F adalah gaya yang dihasilkan oleh poros turbin dan r_{pulley} adalah jari-jari *pulley*. Kemudian sebelum beranjak untuk menentukan efisiensi, perlu diketahui besar dari jumlah kecepatan aliran air (V) melalui rumus,

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{dan} \quad A = \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana Q merupakan tinggi debit air lalu A adalah luas penampang dari nozel dan D merupakan diameter nozel. Efisiensi turbin η telah diperkirakan sebagai,

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana P_{out} adalah daya efektif yang didapat oleh poros turbin dari fluida melalui sudu dan *runner* turbin serta P_{in} adalah gaya indikatif yang diberikan oleh fluida kepada sudu-sudu turbin masing-masing yang telah diperkirakan sebagai,

$$P_{out} = \theta \times \omega \quad \text{dan} \quad \theta = T \times r_{runner} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$P_{in} = \rho \times Q \times g \times H \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

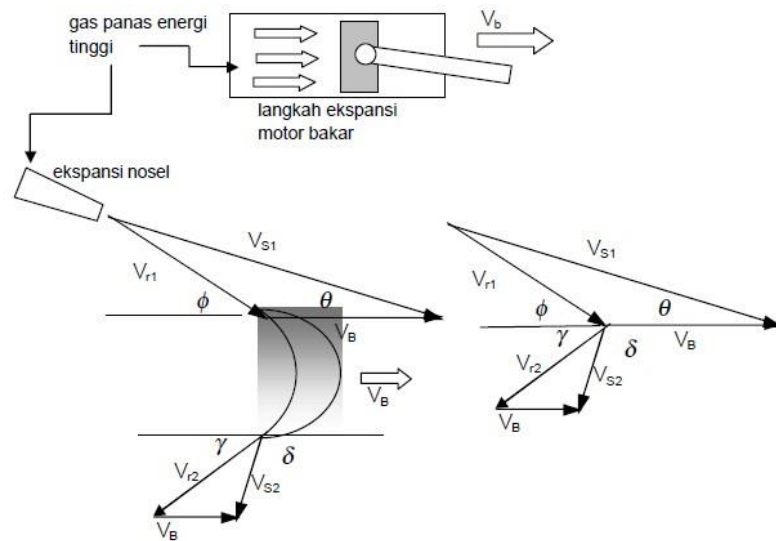
Dimana θ, ω, T , dan r_{runner} adalah koefisien torsi turbin, kecepatan putaran *runner*, output daya dorong tangensial atau torsi dan jari-jari *runner*. Disisi lain Q, g , dan H adalah massa jenis air, laju aliran atau debit air melalui turbin, percepatan gravitasi dan head atau tinggi air yang melintasi turbin.

2.5.3 Segitiga Kecepatan

Segitiga kecepatan adalah dasar kinematika dari aliran fluida gas yang menumbuk sudu turbin. Dengan pemahaman segitiga kecepatan akan sangat membantu dalam pemahaman proses konversi pada sudusudu turbin uap atau pada jenis turbin yang lain. Adapun notasi dari segitiga kecepatan adalah sebagai berikut

V_{s1}	= kecepatan absolut fluida meninggalkan nosel
V_B	= kecepatan sudu
V_{r1}	= kecepatan relatif fluida
V_{r2}	= kecepatan relatif fluida meninggalkan sudu
V_{s2}	= kecepatan absolut fluida meninggalkan sudu
θ	= sudut nosel
ϕ	= sudut masuk sudu
δ	= sudut ke luar sudu
γ	= sudut ke luar fluida

Dari segitiga kecepatan di atas, panjang pendeknya garis adalah mewakili dari besar kecepatan masing-masing. Sebagai contoh, fluida masuk sudu dari nosel dengan kecepatan V_{s1} lalu ke luar dari nosel sudah berkurang menjadi V_{s2} dengan garis yang lebih pendek. Artinya sebagian energi kinetik fluida masuk sudu diubah menjadi energi kinetik sudu dengan kecepatan V_B , kemudian fluida yang sudah memberikan energinya meninggalkan sudu dengan kecepatan V_{s2} . Proses perubahan atau konversi energi pada turbin adalah sama dengan perubahan energi pada motor bakar, tetapi dengan metode yang berbeda. Untuk motor bakar, pada langkah ekspansi fluida gas yaitu gas pembakaran energinya mengalami penurunan bersamaan dengan penurunan tekanan di dalam silinder. Hal itu terjadi karena sebagian energinya diubah menjadi energi kinetik gas pembakaran dan dikenakan langsung pada torak. Karena ada dorongan dari energi kinetik gas pembakaran torak bergerak searah dengan gaya dorong tersebut, kondisi ini disebut langkah tenaga.

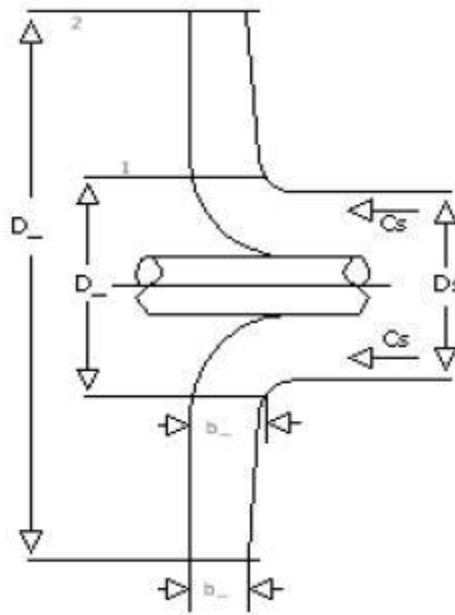


Gambar : 2.28 Segitiga Kecepatan pada Sudu Turbin Impuls (*Kresna Eka Kurniawan.2016*).

Pada turbin, proses perubahan energi mulai terjadi di nosel, yaitu ekspansi fluida gas pada nosel. Pada proses ekspansi di nosel, energi fluida mengalami penurunan, demikian juga tekanannya. Berbarengan dengan penurunan energi dan tekanan, kecepatan fluida gas naik, dengan kata lain energi kinetik fluida gas naik karena proses ekspansi. Kemudian, fluida gas dengan energi kinetik tinggi menumbuk sudu turbin dan memberikan sebagian energinya ke sudu, sehingga sudu pun bergerak. Perubahan energi dengan tumbukan fluida di sudu adalah azas impuls.

Untuk perubahan energi dengan azas reaksi, sudu turbin reaksi berfungsi seperti nosel. Hal ini berarti, pada sudu turbin reaksi terjadi proses ekspansi, yaitu penurunan tekanan fluida gas dengan dibarengi kenaikan kecepatan. Karena prinsip reaksi adalah gerakan melawan aksi, jadi dapat dipahami dengan kenaikan kecepatan fluida gas pada sudu turbin reaksi, sudu turbin pun akan bergerak sebesar nilai kecepatan tersebut dengan arah yang berlawanan.

2.5.4 Segitiga Aliran Kecepatan Fluida di Bucket



Gambar : 2.29 Impeller (Kresna Eka Kurniawan.2016).

Fluida masuk melalui saluran hisap D_s kemudian dalam arah aliran aksial mengalir masuk kedalam impeller dengan kecepatan terbatas C_s . Sudu pompa dimulai dari D_1 , lebar sudunya b_1 . kecepatan mutlak mengalirnya fluida C_1 dan luas penampang yang dilalui aliran fluida = $D_1 \times \pi \times b_1$; maka menurut persamaan kontinuitas didapat

$$b_1 = \frac{Q}{D_1 \cdot \pi \cdot C_1}$$

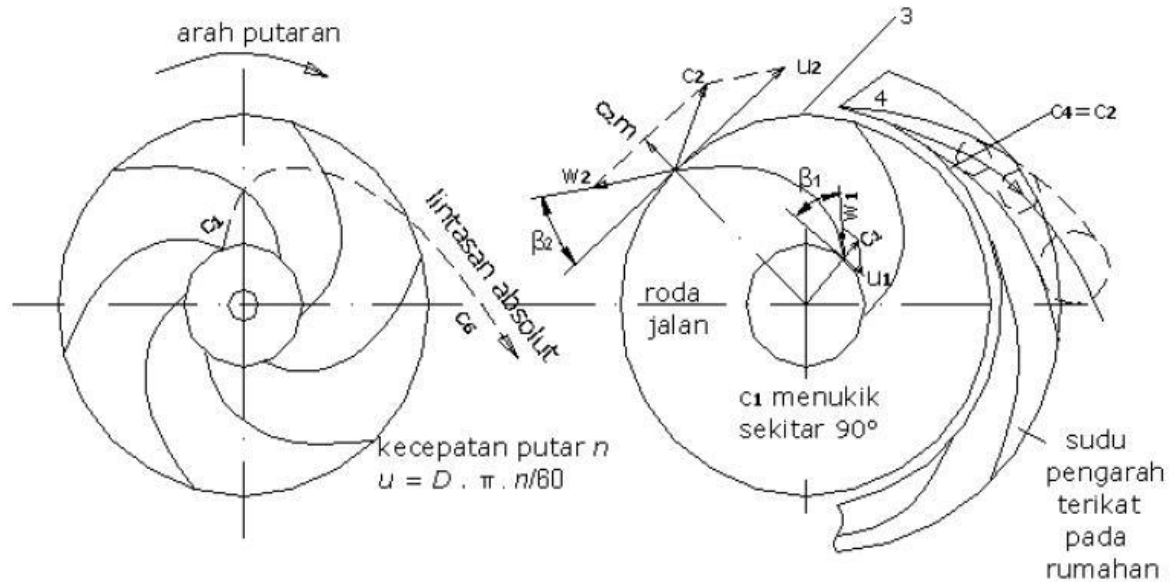
Dimana : b_1 = lebar sudu (m)

Q = kapasitas aliran (m^3/det)

D_1 = diameter masuk sudu pompa (m)

C_1 = kecepatan mutlak aliran fluida masuk sudu impeller (m/det)

Dengan adanya sudu penampang yang dilewati fluida menjadi semakin sempit dan dengan demikian kecepatan fluida mengalir masuk naik sekitar 10 %.



Gambar : 2.30 Segitiga Aliran Kecepatan (Kresna Eka Kurniawan.2016).

Diperoleh kecepatan aliran fluida masuk C1 yang arahnya tegak lurus U1 di dapat dari :

$$U_1 = \frac{D_1 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

Dimana :

n = Kecepatan putaran impeller dalam Rpm

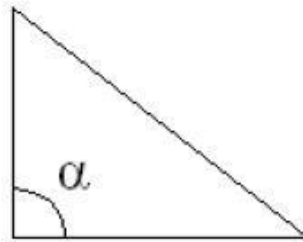
D_1 = Diameter masuk sudu pompa (m)

Keterangan gambar :

W_1 = Kecepatan relative aliran fluida pada sisi masuk

B_1 = Sudut masuk aliran fluida

Lihat gambar segitiga berikut :



$$\alpha = 90^\circ$$

Gambar : 2.31 Segitiga Kecepatan Aliran Fluida Masuk Impeller
(Kresna Eka Kurniawan.2016).

supaya mendapatkan paenghantaran dan pengaliran yang baik maka jumlah sudu impeller harus tertentu, karena adanya gaya sentrifugal pada sudu impeller. Jadi akibat dari berputarnya impeller dengan kecepatan U dan bentuk sudu impeller yang sedemikian rupa didapat kecepatan relative aliran fluida dibagian masuk sudu impeller W_1 dan saluran keluar W_2 . Besarnya kecepatan W didapat dari persamaan kontinuitas. Diameter impeller dibagian keluar D_2 dan pada bagian masuk D_1 . Lebar sudu b_2 hanya sedikit lebih kecil dari pada dibagian masuk b_1 , sehingga pada umumnya W_2 lebih kecil dari W_1 . Pada titik 2 dari gambar 2.7. fluida mempunyai kecepatan keluar mutlak C_2 . Kecepatan keliling impeller pada sisi keluar U_2 adalah :

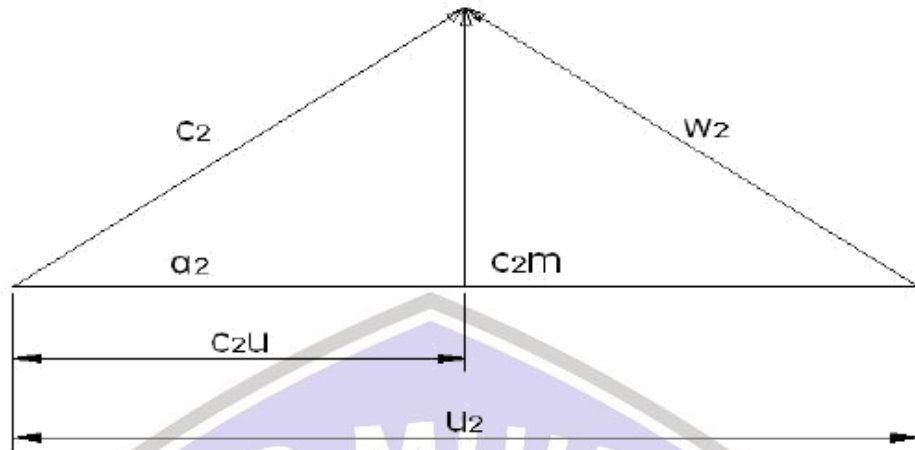
$$U_2 = \frac{D_2 \cdot \pi \cdot n}{60}$$

Dimana :

W_2 = kecepatan relative aliran fluida pada sisi keluar impeller

β_2 = sudut keluar aliran fluida

Untuk pompa sentrifugal sudut impeller yang berguna adalah $15^\circ - 30^\circ$ maksimum sampai 50° .



Gambar : 2.32 Segitiga Kecepatan Aliran Fluida Keluar Impeller (*Kresna Eka Kurniawan.2016*).

Jika pompa dibuat bertingkat, sesudah keluar dari sudu fluida melalui ruang 3 tanpa sudu dan sampai didalam sudu pengarah dengan kecepatan aliran fluida C_4 . Tapi bila konstruksi pompa dibuat sederhana dimana fluida yang keluar dari impeller langsung masuk kedalam rumah pompa, maka kecepatan mutlak aliran fluida keluar C_2 harus diarahkan sedemikian rupa, perpindahan fluida dari impeller kerumah pompa sedapat mungkin bisa bebas tanpa tumbukan.